

**ANALISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA, PARA EL
CORREDOR VIAL CUESTABOBA – MUTISCUA EN EL DEPARTAMENTO DE
NORTE DE SANTANDER, IMPLEMENTANDO EL SOFTWARE ARCGIS.**



**DESARROLLADO POR:
BREIDER LÓPEZ SOLANO
CÓDIGO: 3101351**

**TRABAJO DE GRADO
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
BOGOTÁ DISTRITO CAPITAL
MAYO DE 2017**

ANALISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA, PARA EL CORREDOR VIAL CUESTABOBA – MUTISCUA EN EL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER, IMPLEMENTANDO EL SOFTWARE ARCGIS.

ANALYSIS OF SUSCEPTIBILITY BY MOVEMENTS IN MASS, FOR THE ROAD CORRIDOR CUESTABOBA - MUTISCUA IN THE NORTE DE SANTANDER DEPARTMENT, IMPLEMENTING THE ARCGIS SOFTWARE.

Breider López Solano, Ingeniero Geólogo

breider.lopez.s@hotmail.com

Especialización en Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia, 2017.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the Susceptibility to Massive Movement Occurrence for the Cuestaboba - Mutiscua Road Corridor in the Department of Norte de Santander, based on a multicriteria analysis involving geological and geomorphological variables obtained from the Geology Study for Engineering of said corridor.

The methodology used was based on the Methodological Document of Zoning by Susceptibility and Threat by Mass Movements, developed by the Colombian Geological Service in 2013, where the variables were adjusted according to the criteria of the author based on the previously supplied geological- geomorphological information, where each one of the variables was hierarchized according to the degree of influence by susceptibility to the occurrence of mass movements in the area, applying later the weighted linear combination (WLC) method, from which the final susceptibility map was obtained.

From the results obtained, the areas of greatest susceptibility were determined, which correspond to the object of the study, emphasizing the geological and geomorphological characteristics of each sector, highlighting the aspects identified during the surface survey associated to the development of the geology study for engineering.

For each of the high susceptibility sectors identified along the road corridor, recommendations are made that involve the criteria of specialists in the areas of geology and geotechnics, which in turn allows to reduce the risks of the project, taking into account that the object of the investigation is to develop effective diagnoses of the areas most susceptible to instabilities.

RESUMEN

El presente estudio, tiene como objeto la determinación de la Susceptibilidad ante la Ocurrencia de Movimientos en Masa para el Corredor vial Cuestaboba – Mutiscua en el Departamento de Norte de Santander, a partir de un análisis multicriterio, que involucra las

variables geológicas y geomorfológicas obtenidas del estudio de Geología para Ingeniería de dicho corredor.

La metodología empleada se basó en el Documento Metodológico de Zonificación por Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2013, donde se ajustaron las variables utilizadas de acuerdo a los criterios del autor en relación con la información geológico – geomorfológica suministrada previamente, donde cada una de las variables fue jerarquizada de acuerdo al grado de influencia por susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa en el área, aplicando posteriormente el método de combinación lineal ponderada (WLC), del cual se obtuvo el mapa de susceptibilidad final.

De los resultados obtenidos se determinaron las zonas de mayor susceptibilidad, las cuales corresponden al objeto de análisis del estudio, enfatizando en las características geológico – geomorfológicas de cada sector, resaltando los aspectos identificados durante el reconocimiento de superficie asociado al desarrollo del estudio de geología para ingeniería.

Para cada uno de los sectores de alta susceptibilidad identificados a lo largo del corredor vial, se plantean recomendaciones que involucran los criterios de especialistas en las áreas de geología y geotecnia, lo que a su vez permite reducir los riesgos del proyecto, teniendo en cuenta que el objeto de la investigación radica en desarrollar diagnósticos efectivos de las zonas más susceptibles a presentar inestabilidades.

Introducción

La investigación en desarrollo, surge de la necesidad ante los riesgos que comprenden los proyectos de infraestructura vial, principalmente los asociados a movimientos en masa, los cuales generan constantes afectaciones posteriores a las etapas de diseño, que aumentan los costos y reprocesos en el mantenimiento de los corredores viales a lo largo del territorio nacional, esto partiendo de las características geológicas y geomorfológicas complejas que podemos identificar en muchos sectores del país, ligado principalmente a la evolución de las cordilleras que constituyen los andes colombianos, donde esta problemática es constante.

El método desarrollado a continuación, se basa en un análisis multicriterio utilizando la Herramienta ArcMap del software

ArcGis, que parte del *Documento Metodológico de Zonificación por Susceptibilidad y Amenaza Por Movimientos En Masa* (Servicio Geológico Colombiano, 2013), documento al cual se aplicaron algunos ajustes que involucran únicamente criterios geológicos y geomorfológicos, determinados previamente para el desarrollo del *Volumen de Geología para Ingeniería Fase III Corredor Bucaramanga – Pamplona, Unidad Funcional 3 Cuestaboba – Mutiscua* (Geotecnia y Cimentaciones SAS, 2017).

De lo anterior se plantea a continuación una alternativa, desde el punto de vista de la Geomática que ayuda a generar un diagnóstico de los sectores más susceptibles a presentar movimientos en masa para el corredor vial Cuestaboba – Mutiscua en el departamento de Norte de Santander, profundizando en los sectores a intervenir desde el punto de vista geotécnico y planteando recomendaciones

en los diseños geométricos, de tal manera que se reduzcan los riesgos del proyecto.

Localización general del proyecto

El área de interés se localiza al oriente del territorio colombiano, entre las ciudades principales de Bucaramanga y Pamplona, sobre la Vía 2663, más exactamente entre las poblaciones de Cuestaboba y Mutiscua, entre los PR 70 y 97, abarcando las abscisas K69+800 y K99+220 del diseño geométrico proyectado para una longitud total de 29,42 Km, donde se proyectan obras de infraestructura vial para el mantenimiento y rehabilitación de este corredor principal.

Geológicamente el área se localiza en el sector septentrional – medio de la cordillera central, donde sobresalen eventos geológicos complejos que levantaron la cordillera, producto de la colisión entre placas tectónicas, disponiendo a lo largo del corredor una serie de unidades geológicas que abarcan edades entre el Paleozoico y el Cretáceo, además de Depósitos Cuaternarios asociados a procesos de denudación y posterior deposición que los localizan cubriendo parcialmente las formaciones principales.

Además a lo largo del corredor predomina una morfología media a alta de pendientes escalonadas afectadas por eventos denudaciones y de meteorización intensa, que generan niveles residuales de composición variable de acuerdo con las características genéticas de los mismos, y que en muchos sectores condicionan la estabilidad del terreno.

Es importante resaltar que las características geológico-geomorfológicas asociadas al área de estudio, parten de un

componente tectónico complejo, limitado al occidente por el Sistema de Fallas de Bucaramanga y al oriente por los Sistemas de Mutiscua y Pamplona, siendo estructuras principales que generan afectaciones varios kilómetros a lado y lado de sus lineamientos principales, determinando una intensidad de fracturamiento muy significativa en los materiales rocosos y unas características sísmicas de alta complejidad.

Materiales y Métodos

La información principal para el desarrollo de la presente investigación, nace de la elaboración del Estudio de Geología para Ingeniería a nivel Fase III, del Corredor Vial Bucaramanga – Pamplona, Unidad Funcional 3 Cuestaboba – Mutiscua, el cual se elaboró por la empresa Geotecnia y Cimentaciones SAS en el presente año (2017), estudios que cuentan con cartografía geológica y morfogenética a detalle (1:2000), además del levantamiento de sitios inestables activos, plasmados en una base topográfica detallada LIDAR, con curvas de nivel cada metro.

La información anteriormente mencionada fue facilitada por la compañía Geotecnia y Cimentaciones SAS en virtud de obtener algunos resultados que permitan optimizar los diseños contemplados en los volúmenes geológicos y de taludes, además de la interpretación del corredor desde el punto de vista de la localización de los sectores de mayor susceptibilidad a presentar afectaciones por movimientos en masa, que permitirá realizar interpretaciones a futuro del comportamiento de las obras y el planteamiento de recomendaciones generales para el proyecto en materia de

riesgos económicos y de la integridad de las obras proyectadas.

Teniendo en cuenta el objeto de la investigación, se procedió a generar la información faltante para el desarrollo del mismo, la cual parte de la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM) en base a las curvas de nivel LIDAR suministradas, del cual se derivan los mapas que conforman la Morfometría (Pendientes, Rugosidad y Acuencia).

Selección de criterios

La investigación está enmarcada en el análisis multicriterio para determinar las zonas más susceptibles a generar afectaciones por movimientos en masa a lo largo del corredor Cuestaboba – Mutiscua, donde los factores involucrados son determinados mediante el análisis previo del autor, de acuerdo a los insumos bases

que involucran los volúmenes de geología para ingeniería dentro de los estudios de Infraestructura vial.

De lo anterior, se resaltan como insumos principales las características geológicas y geomorfológicas, las cuales son procesadas partiendo del *Documento Metodológico de Zonificación por Susceptibilidad y Amenaza Por Movimientos En Masa* (Servicio Geológico Colombiano, 2013), siendo este un documento muy amplio, por lo que simplificarán los criterios determinados de acuerdo al enfoque geológico – geomorfológico que encierra el proyecto (Figura 1).

La determinación de estos factores geológico – geomorfológicos, permitirán generar diagnósticos puntuales, que servirán como insumo al área de geotecnia, para la toma de decisiones en cuanto a la implementación y recomendaciones de obras proyectadas.

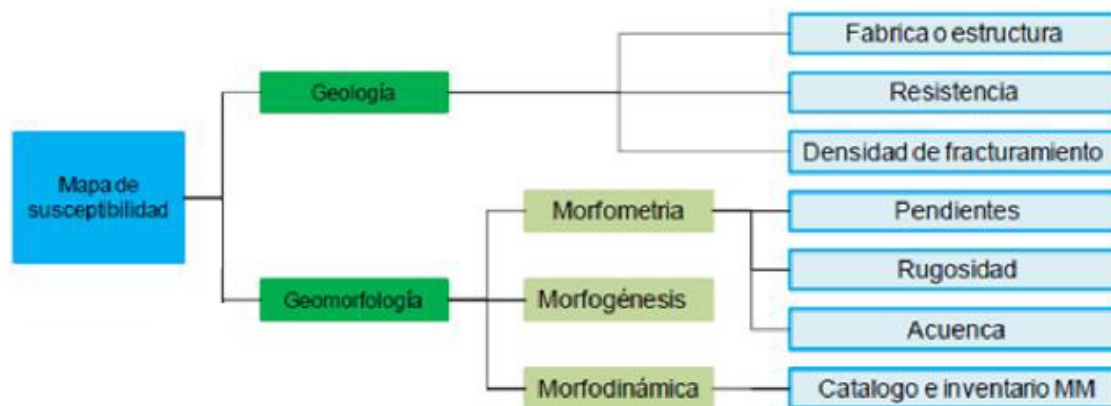


Figura 1. Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad, para el desarrollo del estudio, ajustado del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Clasificación de las Variables

Con base en el análisis y selección de los criterios geológico - geomorfológicos a utilizar para el desarrollo del estudio, se procedió a la jerarquización (Valor porcentual de acuerdo a la influencia de la

variable) de los mismos, esto, teniendo en cuenta que cada variable tiene una influencia en el área desde el punto de vista de la susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, la cual está sujeta a valores numéricos estandarizados de

acuerdo a los criterios de los especialistas (1).

“Una vez los criterios o variables de calificación han sido estandarizados o parametrizados y sus respectivos pesos han sido establecidos, el método de la combinación lineal ponderada o WLC por sus siglas en inglés (Voogd, 1983), es el más simple método para la agregación de los criterios de evaluación en un criterio de calificación. Así, según el método WLC, el índice de susceptibilidad a movimientos en masa (ISD) se obtiene de la suma de cada criterio de evaluación multiplicado por su respectivo peso (obtenido de la calificación AHP)” (Servicio Geológico Colombiano, Documento Metodológico de Zonificación

por Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa. 2013, Pag 103) (1), lo que determina la superposición de superficies arrojando como resultado el índice de Susceptibilidad de la siguiente manera:

$$IS = \sum_{i=1}^n Ci * Vi (1)$$

Donde:

IS = Índice de Susceptibilidad

n = Número de variables

c = Criterio de evaluación

v = Peso de cada variable

Las variables ajustadas para el desarrollo de la investigación se determinaron de la siguiente manera (Figura 2):

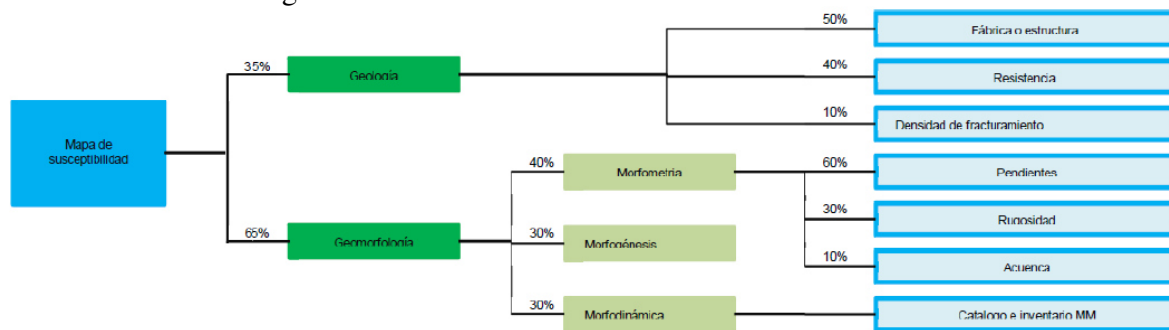


Figura 2. Diagrama de Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad objeto del presente estudio, ajustado del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Resultados y Análisis

Susceptibilidad por Geología

En primera instancia se generan los mapas base para la determinación de la susceptibilidad por Geología, los cuales comprenden las características de Fábrica, Resistencia y Densidad de Fracturamiento, como se describe a Continuación:

Fábrica o Estructura: “Se refiere al arreglo de partículas, grupos de partículas y espacios vacíos en un suelo. El término *estructura* es utilizado por algunos como

sinónimo de fábrica, sin embargo, la estructura tiene un significado más amplio, que integra los efectos combinados de la fábrica, composición y fuerzas entre partículas. La fábrica, estudiada a nivel de microscopía óptica se conoce como *microfábrica*, mientras que los rasgos que pueden ser identificados a simple vista o con ayuda de una lupa, tales como estratificación, fisuramiento, vacíos y no homogeneidad, se identifican como la *macrofábrica*.” (SGC, 2013, Pág. 49).

“La fábrica tiene gran influencia en el comportamiento de los suelos y rocas, en

especial en lo referente a la anisotropía que genera debido a la orientación de las partículas, la cual así mismo gobierna anisotropía en las propiedades geomecánicas, la clasificación de las rocas según su fábrica/estructura, puede servir para establecer diferencias de las rocas en cuanto a su resistencia y direccionalidad de las propiedades mecánicas” (SGC, 2013, Pág. 49).

Tabla 1. Clasificación de la Fábrica/Estructura

FÁBRICA/ESTRUTURA	
Atributo	Propuesta de Clasificación
N/A	0
Cristalina Masiva	1
Cristalina Bandeadas	2
Cásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4
Cristalina Foliada y Rocas de Falla	5

Clasificación tomada del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

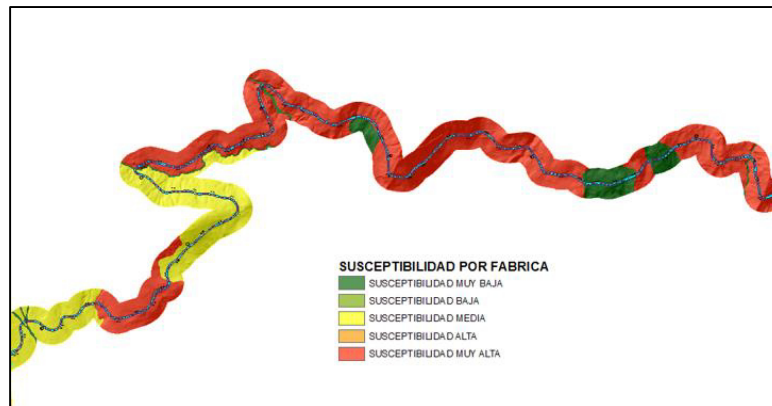


Figura 3. Vista general de resultados de Mapa de Susceptibilidad por Fábrica o Estructura, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Resistencia: Como su nombre lo indica, este criterio evalúa el grado de resistencia de los materiales que comprenden el área de interés, donde se analiza mediante documentos bibliográficos o ensayos de laboratorios las características de los materiales rocosos y depósitos, lo que a su vez está directamente relacionado con los procesos de erosión y meteorización que han afectado los materiales en dicha área (SGC, 2013) (1).

Tabla 2. Clasificación Resistencia de las Rocas

GRADO	TÉRMINO	PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN
R6	Extremadamente dura	1
R5	Muy Dura	1
R4	Dura	2
R3	Moderadamente Dura	3
R2	Blanda	4
R1	Muy Blanda	5
R0	Extremadamente Blanda	5

Tomado de la clasificación de Resistencia de las rocas (Tabla 6, Pág. 32), del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013 (1).

Tabla 3. Clasificación Resistencia de los Depósitos asociados al área de estudio

AMBIENTE	DEPÓSITO	CLASIFICA
Denudacional	Coluvial	5
Fluvial	Aluvial	1

Tomado de la clasificación de Depósitos (Tabla 9, Pág. 43), del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR

MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013. (1).

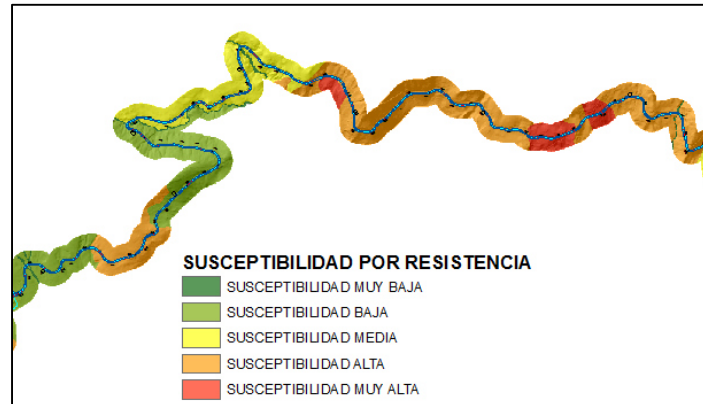


Figura 4. Vista general de resultados de Mapa de Susceptibilidad por resistencia, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Densidad de Fracturamiento: Para la escala del proyecto este criterio evalúa la afectación generada a partir de las fallas geológicas que atraviesan el corredor, donde de acuerdo a la complejidad de las mismas intervienen varios kilómetros a lado y lado de su lineamiento principal haciendo que la susceptibilidad por densidad de fracturamiento sea mucho mayor entre más cerca se esté de dichas estructuras (SGC, 2013) (1).

Por tanto la evaluación de densidad de fracturamiento para el corredor vial en

estudio, pate de la interacción que existe con el sistema de Falla de Mutiscua que comprende parte de Sistema de Fallas de Pamplona, siendo una zona compleja desde el punto de vista neotectónico donde a lo largo del tiempo geológico, se han generado afectaciones constantes por estas estructuras que conforman los sistemas principales, haciendo que la densidad de fracturamiento a lo largo de los lineamientos principales y fallas satélites sea alta (Figura 5).



Figura 5. Vista general de resultados de Mapa de Susceptibilidad por Densidad de Fracturamiento, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Posteriormente se implementó la herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools, del ArcMap, donde de acuerdo a la Jerarquización establecida previamente en la metodología (Figura 2), se determinó la Susceptibilidad por Geología para el corredor vial, obteniendo el primero de los dos insumos principales para la determinación de La Susceptibilidad final por Movimientos en Masa (Figura 6 y Figura 7).

Weighted overlay table

Raster	% Influence	Field	Scale Value
FAB_ESTRUCT	50	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
		NODATA	NODATA
RESISTENCIA	40	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
		NODATA	NODATA
DENSIDAD_FRACT	10	Value	
		1	1
		3	3
		4	4

Sum of influence: 100 Set Equal Influence

Evaluation scale: 1 to 9 by 1 From: To: By:

Figura 6. Aplicación de la jerarquización mediante la utilización de la herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools en ArcMap, para obtener el Mapa de Susceptibilidad por Geología.

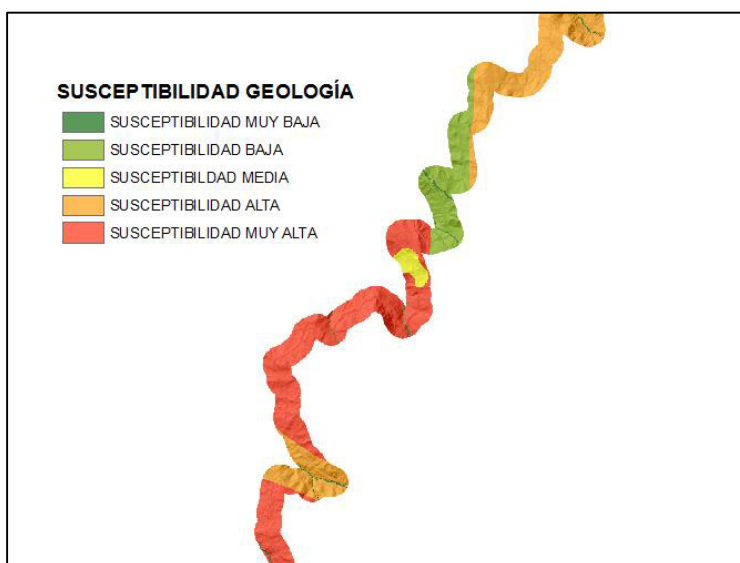


Figura 7. Vista general de resultados de Mapa de Susceptibilidad por Geología, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Susceptibilidad Por Geomorfología

De la misma manera como se generó el mapa de susceptibilidad por geología se procedió a generar los mapas base para la generación de la Susceptibilidad Geomorfológica, de los cuales se resalta la Morfometría, ya que esta superficie, está determinada por una serie de subcriterios, generados a partir del Modelo de Elevación, el cual parte de las curvas de nivel LIDAR utilizadas en el estudio de Geología para Ingeniería (estudio realizado por Geotecnia y Cimentaciones, año 2017), a continuación se describen los resultados obtenidos del proceso para la obtención del Mapa de Morfometría, Morfogénesis y Morfodinámica, lo que dio como resultado la generación del mapa de Susceptibilidad por Geomorfología.

Morfometría: Como se mencionó anteriormente la generación de este mapa involucra una serie de subcriterios, que corresponden a mapas, generados a partir del Modelo de Elevación del Terreno

(DEM), el cual a su vez es generado a partir de las curvas de nivel suministradas, donde se representa mediante un raster las características de altitud del terreno (Figura 8).

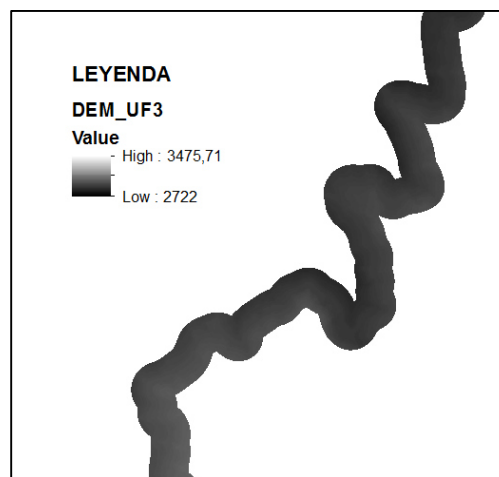


Figura 8. Vista General DEM del corredor vial en estudio.

Los subcriterios que comprende la Morfometría, corresponden al Mapa de Pendientes, Rugosidad y Acuenca, cuya generación está estandarizada por algunos métodos implementando las herramientas

del ArcMap, como lo son Slope, Terrain y Flow Accumulation respectivamente, de lo cual se obtuvo los siguientes resultados

(Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12).

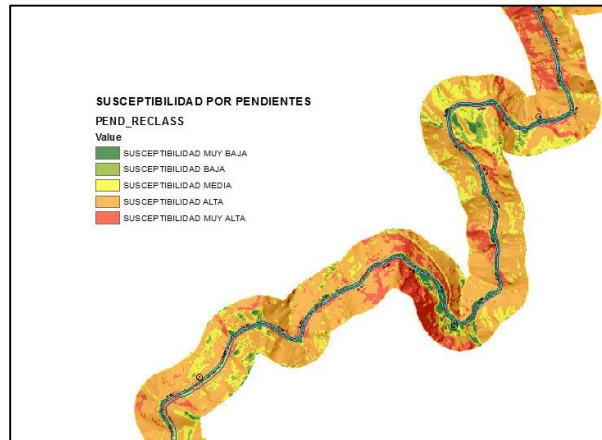


Figura 9. Vista general Mapa de Susceptibilidad por pendientes, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

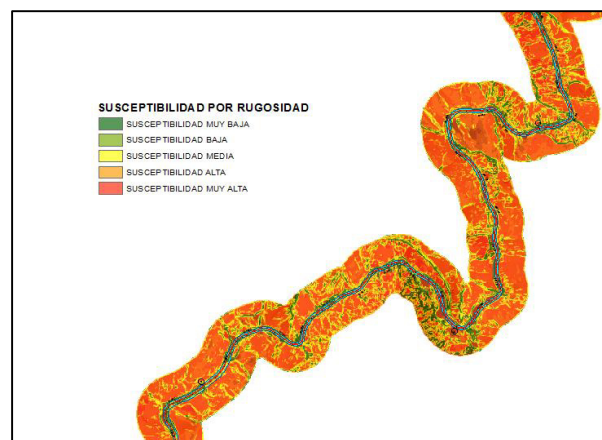


Figura 10. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Rugosidad, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

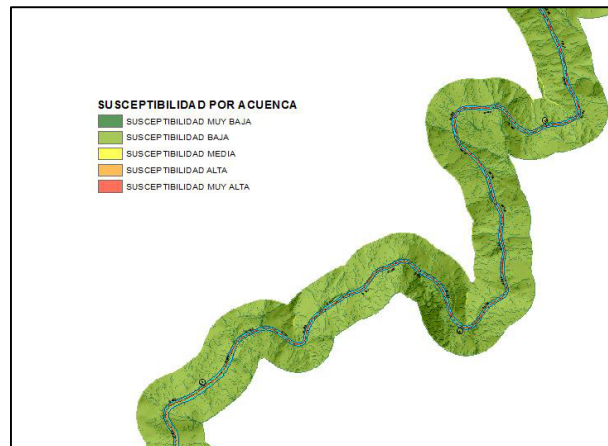


Figura 11. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Acuenca, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

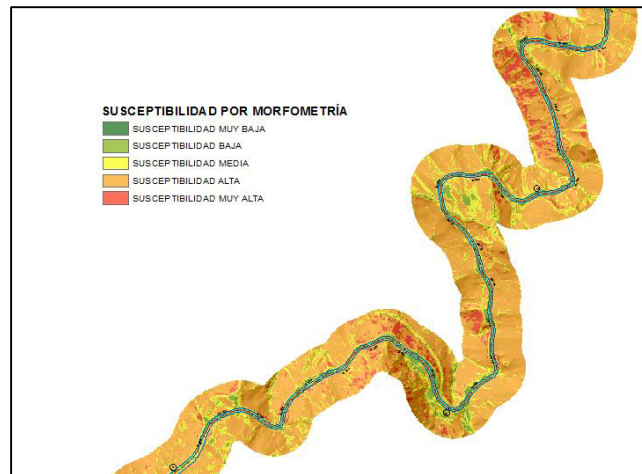


Figura 12. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Morfometría, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Morfogénesis: este criterio evalúa los ambientes morfogenéticos y las respectivas geoformas que caracterizan al corredor vial, lo cual indica los diferentes eventos que conllevan a la evolución del paisaje.

La evaluación anteriormente descrita se basó en reconocimientos de campo e

interpretaciones generales, determinadas dentro del estudio de Geología para Ingeniería (GYC, 2017) suministrado para la elaboración del presente estudio, donde los resultados obtenidos, de acuerdo a las características del corredor vial, se presentan a continuación (Tabla 4 y Figura 13).

Tabla 4. Clasificación Unidades Morfogénesis

AMBIENTE	CODIGO	UNIDAD	CLASIFICACIÓN
Denudacional	Dc	Cima	3
	Dco	Cono o Lóbulo Coluvial	4
	Deem	Escarpe de Erosión Mayor	3
	Dsr	Sierra Residual	3
Fluvial	Fca	Cauce Aluvial	1
Estructural	Sce	Cerro Estructural	4

Tomado de la clasificación de las Unidades Morfogénéticas (ANEXO 1), del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013. (1).

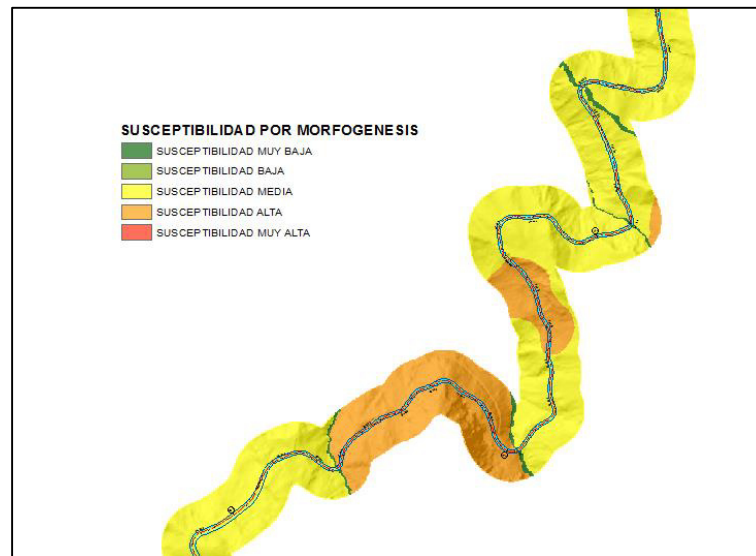


Figura 13. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Morfogénesis, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Morfodinámica: La morfodinámica, hace referencia a los sectores inestables activos y zonas potencialmente activas identificadas los cuales de acuerdo a su grado de complejidad, pueden generar una mayor influencia en el corredor vial en cuanto a la generación de nuevos eventos morfodinámicos.

El reconocimiento de estos sectores inestables, se basó en los resultados del

estudio de Geología para Ingeniería desarrollados por la compañía Geotecnia y Cimentaciones en el presente año (2017), donde de acuerdo al análisis de los resultados se procedió a la representación de la Morfodinámica en un raster (Figura 14), el cual posteriormente complementará los criterios base para la elaboración del mapa de Susceptibilidad por Geomorfología.

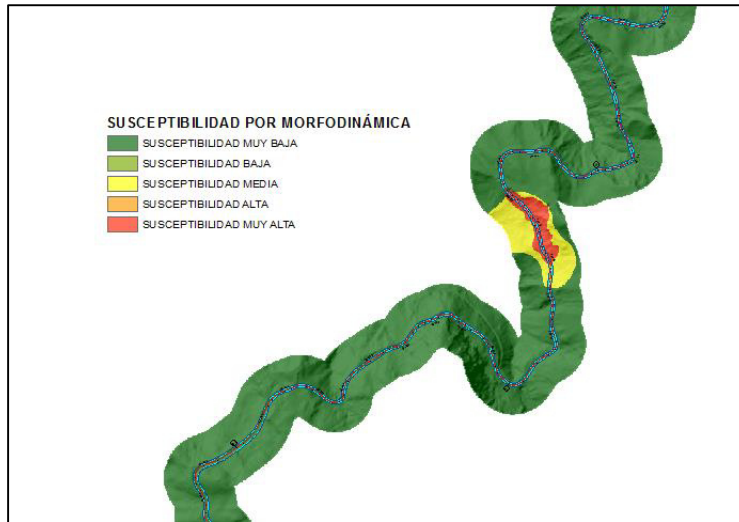


Figura 14. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Morfodinámica, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Partiendo del desarrollo de los Raster base, se procedió a la elaboración del Mapa de Susceptibilidad por Geomorfología, donde se conjugan las características principales del paisaje, de acuerdo a la metodología empleada, obteniendo como resultado un mapa que resalta las características Morfogenéticas, Morfométricas y Morfodinámicas del corredor, evaluando el grado de susceptibilidad resultante de la superposición de capas (

Weighted overlay table			
Raster	% Influence	Field	Scale Value
MORFOMETRIA	40	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
		NODATA	NODATA
MORFOGENES	30	Value	
		1	1
		3	3
		4	4
		NODATA	NODATA
MORFODINAMICA	30	Value	
		1	1
		3	3
		5	5
		NODATA	NODATA

Sum of influence: 100
 Evaluation scale: 1 to 9 by 1
 Set Equal Influence: From To By

Figura 15. Aplicación de la jerarquización mediante la utilización de la herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools en ArcMap, para obtener el Mapa de Susceptibilidad por Geomorfología.

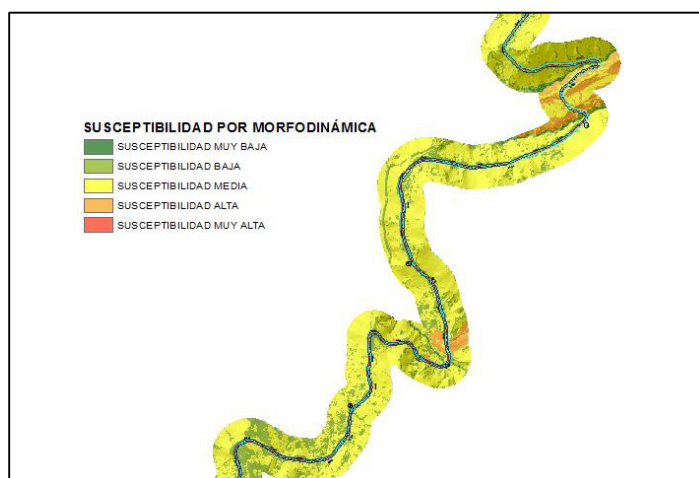


Figura 16. Vista general Mapa de Susceptibilidad por Geomorfología, en base a la Jerarquización determinada dentro del DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013.

Consecutivamente según el modelo metodológico implementado en el presente estudio, y partiendo de los resultados obtenidos en cuanto a la base de susceptibilidad geológica y geomorfológica, se determinó el mapa de susceptibilidad final, el cual mediante el mismo proceso de superposición de capas

implementando la herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools, se determinaron las zonas de mayor Susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa, las cuales son el objeto de estudio y se describen a detalle a continuación.

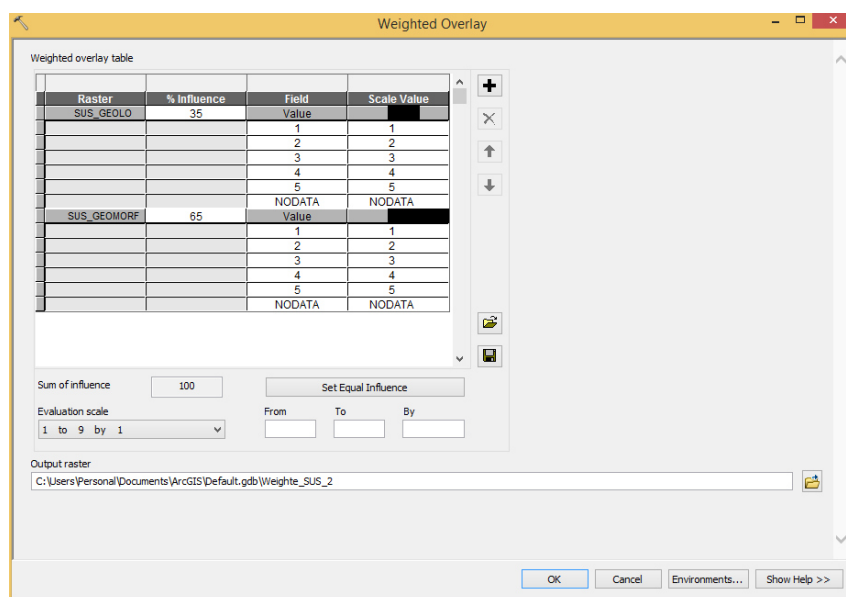


Figura 17. Aplicación de la jerarquización mediante la utilización de la herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools en ArcMap, para la obtención del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa para el corredor vial en estudio.

Sector K77+700 – K78+660

Se puede observar en este tramo una susceptibilidad Media a Alta (Figura 18), determinada por sectores coluviales y residuales de espesores medios a finos, dispuestos en zonas de pendientes altas a media-altas, donde actualmente se desarrollan algunos procesos de erosión

superficial y reptaciones leves que interactúan constantemente con el corredor vial, además, en los sectores de afloramientos rocosos, es común observar desprendimientos de bloques que parten de la disposición de las discontinuidades que caracterizan al macizo y que a su vez están relacionadas con la complejidad tectónica del área.

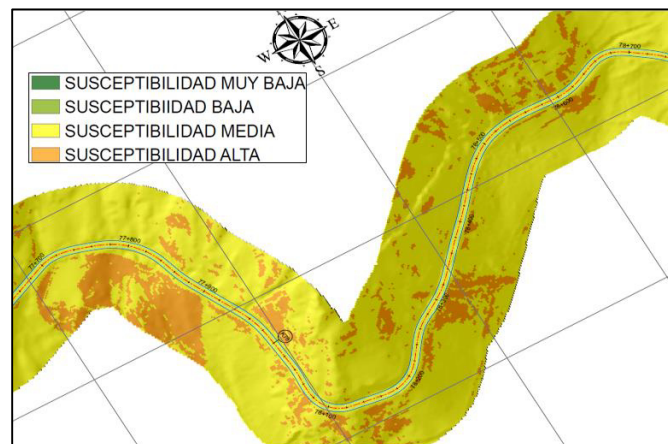


Figura 18. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K77+700 – K78+660.

A continuación se describen algunas de las características registradas durante el reconocimiento de superficie y que ratifican las afectaciones que se vienen dando en este tramo de susceptibilidad media a alta (Fotografía 1 y Fotografía 2).



Fotografía 1. Afectación por procesos de erosión superficial y reptaciones leves que alcanzan el talud externo de la vía, donde se presenta pérdida de la

banca, sector K78+300. 2017 Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.



Fotografía 2. Afectación hacia el talud interno de la vía, se presentan caídas de bloques resultantes de la disposición de las discontinuidades que constituyen al macizo rocoso, donde partiendo de las características tectónicas regionales, se presenta un intenso fracturamiento en el mismo, K77+800. 2017 por Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

Sector K79+300 – K79+900

Se determina en este sub-tramo del corredor una susceptibilidad media a alta (Figura 19), determinada por la presencia de depósitos coluviales, de espesores variables, dispuestos en pendientes altas a media-altas, donde es común observar en desarrollo de algunos procesos rotacionales y reptaciones leves que involucren puntualmente la vía (Fotografía 3).

Se presentan también en este tramo algunos niveles residuales espesos, los cuales son muy susceptibles a generar desplazamientos en masa, principalmente en zonas de morfología alta a media-alta como se presenta en el sector, lo anterior partiendo de los intensos procesos denudacionales y de meteorización que alteran los materiales originales y generan estos suelos insitu además de la conjugación con procesos hidrogravitacionales que generan los depósitos coluviales anteriormente mencionados.

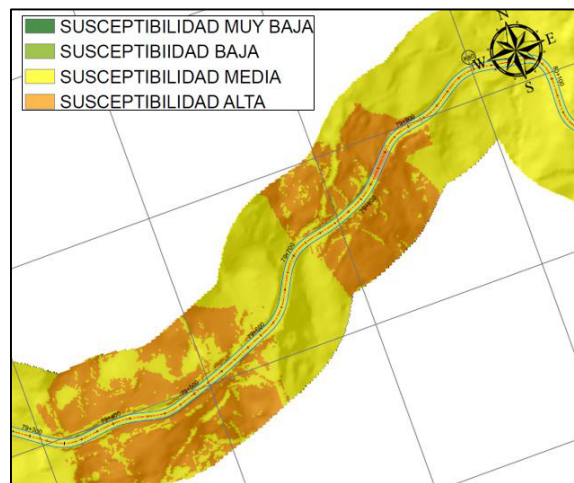
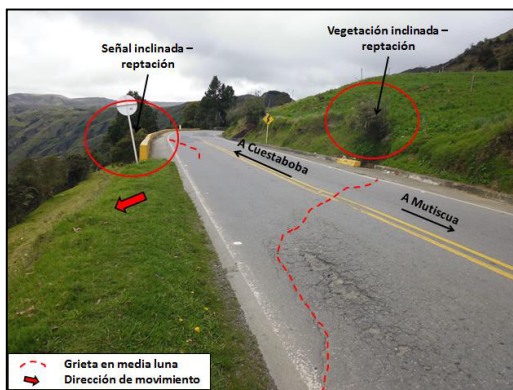


Figura 19. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K79+300 – K79+900.



Fotografía 3. Se identifica en el sector movimientos rotacionales en depósitos coluviales que involucran afectaciones sobre la vía, tanto en el talud interno como en el talud externo, K79+900. 2017 por

Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

Sector K80+400 – K80+800

Sector de Susceptibilidad media a alta (Figura 20), donde se presentan características geológicas determinadas por la presencia de niveles coluviales y residuales mal seleccionados, de espesores y área variable, donde se presentan inestabilidades de tipo rotacional, reptaciones y flujos que afectan la vía en sectores puntuales.

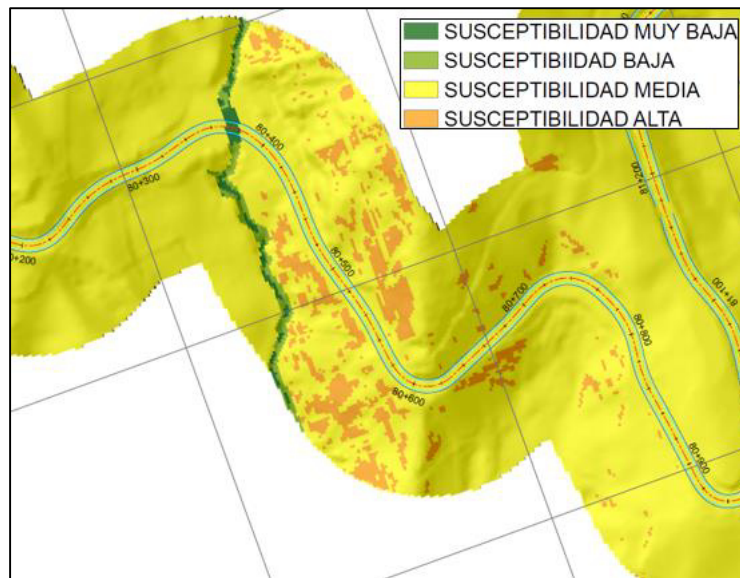


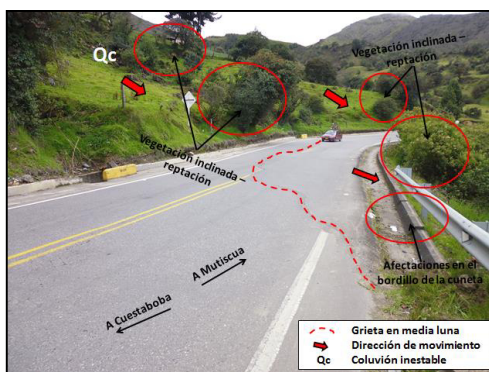
Figura 20. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K80+400 – K80+800.

Durante el reconocimiento de superficie se determinaron algunas afectaciones activas que interactúan con el corredor vial, lo que a su vez está relacionado con las características de susceptibilidad procesadas en el presente estudio, además es un factor determinante para la toma de decisiones en los sectores de alta susceptibilidad y media susceptibilidad, donde actualmente no se han desarrollado procesos (Fotografía 4).

Fotografía 4. Sector inestable K80+400, se identifican afectaciones hacia el talud interno y externo de la vía, por movimiento rotacional en material coluvial. 2017 por Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

Sector K84+980 – K90+400

En este sub-tramo se presenta una susceptibilidad alta a media (Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24), caracterizado por presentar una morfología alta de pendientes onduladas y crestas redondeadas, donde predominan niveles residuales gruesos, de composición variable, fuertemente influenciada por efectos neotectónicos que se derivan de los sistemas de fallas principales adyacente, donde es común identificar algunos procesos de reptación y erosión superficial que detonan en algunos flujos que alcanzan la vía (Fotografía 5).



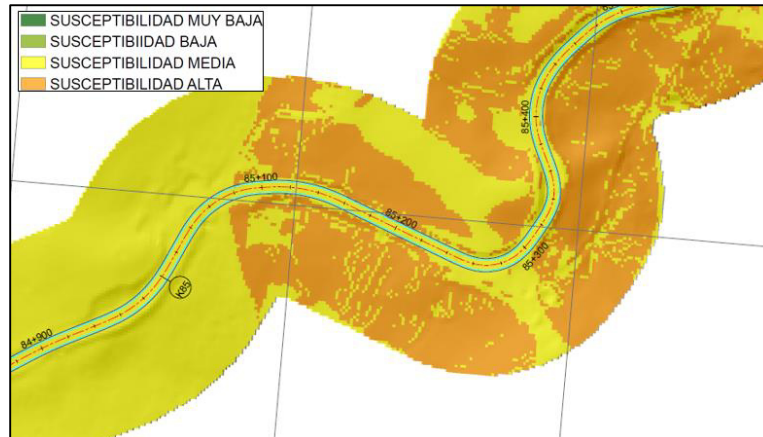


Figura 21. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K84+980 – K85+500.

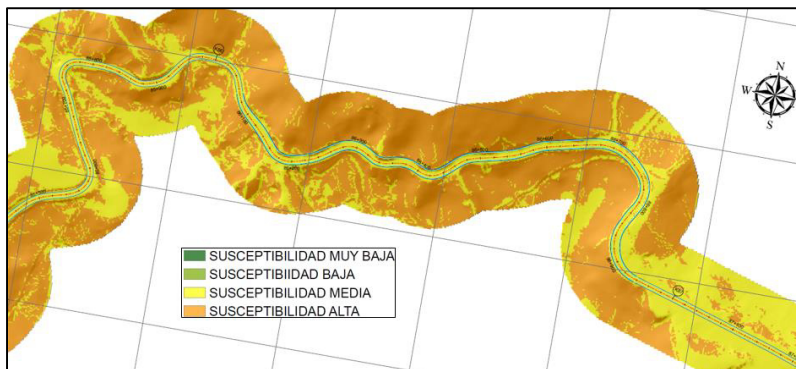


Figura 22. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K85+500 – K87+200.

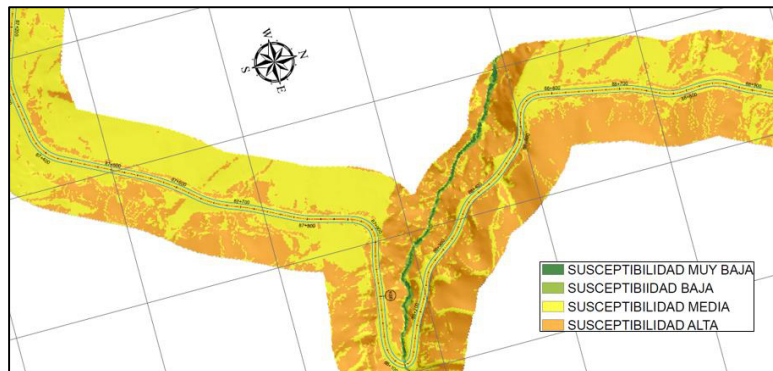


Figura 23. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K87+200 – K88+900.

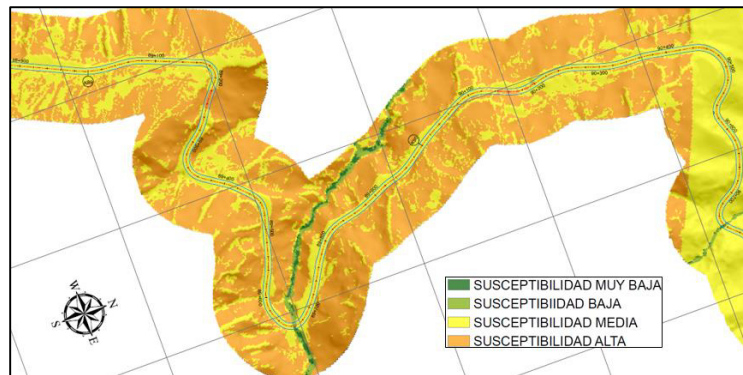
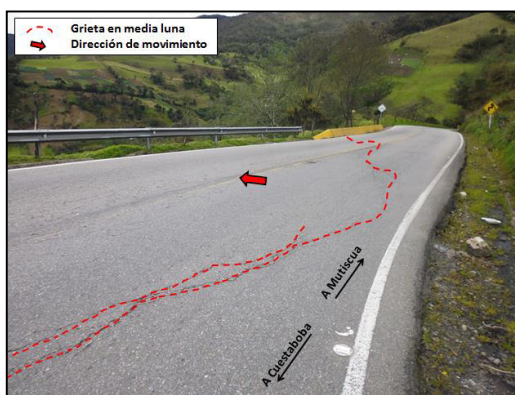


Figura 24. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K88+900 – K90+400.



Fotografía 5. Proceso de desconfinamiento que involucra en material residual infrayacente y que alcanza el talud externo de la vía, K89+700. 2017 por Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

Sector K91+300 – K93+960

En este sector se determinó una susceptibilidad media a alta (Figura 25 y Figura 26, donde se presentan unas características geológicas y geomorfológicas similares al sub-tramo anterior (K84+980 – K90+400), donde intervienen niveles residuales gruesos y depósitos puntuales asociados a eventos denudacionales y de meteorización que alteran las características de los materiales originales, generando estos niveles menos

competentes muy susceptibles a generar desplazamientos de tierras que pueden intervenir con el corredor vial.

Consecuentemente, en el área se presenta una intervención directa por efectos neotectónicos derivados de la actividad de los principales sistemas de fallas adyacentes, lo cual es un factor determinante ya que partiendo de la calidad de la roca, posteriormente se generan alteraciones de las mismas, dando lugar a niveles residuales y coluviales que cubren el sustrato.

Por otro lado en el sector predomina una morfología alta a escarpada con algunas transiciones planas, con un dominio denudacional bien marcado, siendo determinante desde el punto de vista geomorfológico para la activación de las inestabilidades potenciales.

Durante el reconocimiento de capo, se identificaron algunos procesos inestables activos que agrupan algunas de las características geológico geomorfológicas que generan la alta susceptibilidad en este sub-tramo del corredor vial objeto de estudio.

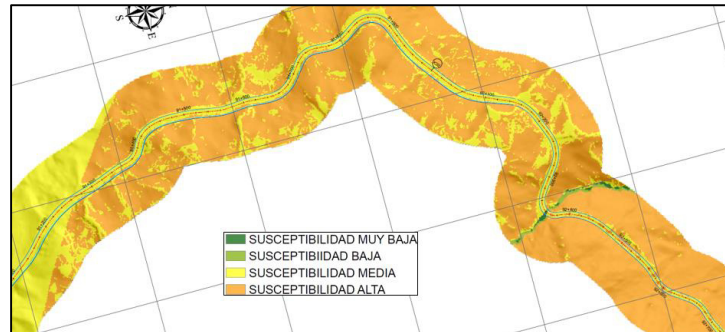


Figura 25. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K91+300 – K92+700.

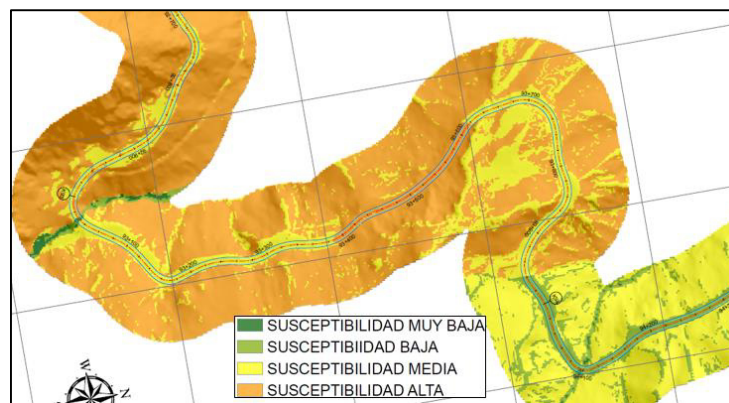
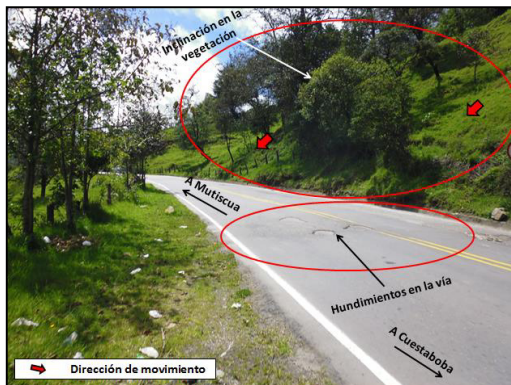


Figura 26. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K92+700 – K93+960.



Fotografía 6. Afectaciones por movimiento rotacional hacia el talud externo de la vía K93+900.

2017 por Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

Sector K96+400 – K96+720

Sector de amenaza media a alta (Figura 27), donde se identifica puntualmente algunos procesos derivados del desplazamiento de material residual resultante de la alteración de rocas sedimentarias clásticas, los cuales involucran directamente el corredor vial en estudio (Fotografía 7).

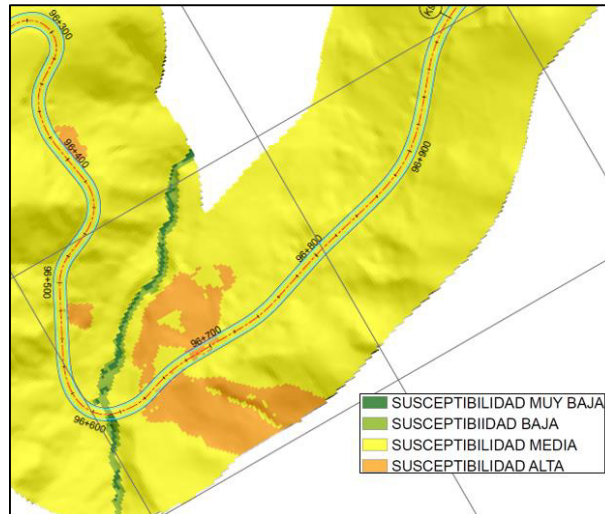


Figura 27. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K96+400 – K96+720.



Fotografía 7. Eventos inestables complejos en material residual de rocas sedimentarias que afectan constantemente la vía y zonas urbanas adyacentes, K96+700. 2017 por Geotecnia y Cimentaciones SAS. Reimpreso con permiso.

A este sector de susceptibilidad alta (Figura 28) se atribuyen factores potencialmente inestables como la presencia de depósitos coluviales dispuestos en un terreno de morfología media-alta, donde se desarrollan algunos eventos de erosión superficial y reptaciones leves, las cuales actualmente no generan afectaciones significativas al corredor, sin embargo debido a la alta susceptibilidad se recomienda un monitoreo de las obras a lo largo de este sub-tramo y un análisis más detallado de las proyecciones determinadas durante el desarrollo del proyecto.

Sector K98+035 – K98+300

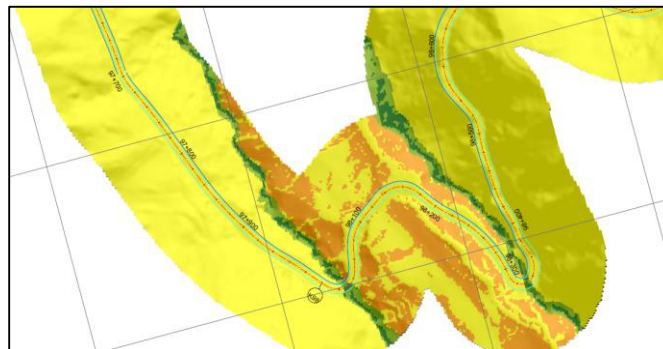


Figura 28. Susceptibilidad ante la ocurrencia de Movimientos en masa, partiendo de las características geológico – geomorfológicas del corredor vial Cuestaboba – Mutiscua Sector K98+035 – K98+300.

Conclusiones

El desarrollo del proyecto se basó en la selección de la información base, partiendo de los productos derivados del Estudio de Geología para Ingeniería a nivel Fase III del Corredor Cuestaboba – Mutiscua en el departamento de Norte de Santander, donde se analizan y describen las características geológicas y geomorfológicas que caracterizan dicho corredor vial, siendo estos insumos una base para la elaboración de Mapas de Zonificación por Susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa enmarcados en un contexto geológico – geomorfológico, teniendo en cuenta que dicha susceptibilidad puede ser determinada con la inclusión de otras variables, sin embargo el objeto de la presente investigación se direccionó al manejo de la información que comprenden estos proyectos de geología para ingeniería que dan respuesta a los parámetros y necesidades que conllevan las obras de infraestructura vial.

Posterior a la selección de las variables a utilizar para el desarrollo del análisis multicriterio, se generó la información complementaria necesaria, partiendo del DEM base derivado de las curvas de nivel suministradas por parte del Estudio de Geología para Ingeniería (Geotecnia y Cimentaciones SAS, 2017), información que fue organizada en formato Raster dentro de una GDB mediante la utilización del software ArcGis, que permitió llevar un orden consecuente al proceso de análisis.

Consecuente a la generación de la información complementaria para el desarrollo del análisis, se procedió a desarrollar la superposición de capas, mediante una jerarquización basada inicialmente en el *Documento Metodológico de Zonificación por Susceptibilidad y Amenaza Por Movimientos En Masa* del

Servicio Geológico Colombiano, año 2013, con algunas modificaciones teniendo en cuenta las variables utilizadas en la investigación de acuerdo a las necesidades que encierran los estudios de geología para ingeniería en los proyectos de infraestructura vial. Esta superposición de mapas se desarrolló mediante la Herramienta Weighted Overlay, del Spatial Analyst Tools en ArcMap, donde se aplicó la jerarquización determinada por el autor de la investigación, siendo un peso de 65% para la susceptibilidad geomorfológica y un peso del 35% para la susceptibilidad Geológica.

Partiendo de los resultados obtenidos para la Susceptibilidad geológico – geomorfológica ante la ocurrencia de movimientos en masa, se determinaron siete sectores de susceptibilidad alta a media, en los cuales de acuerdo al reconocimiento de superficie que involucró el desarrollo del Estudio de geología para ingeniería, están directamente relacionados con algunos procesos puntuales que actualmente afectan la vía, lo que desde el punto de vista geológico geotécnico, indican a los especialistas encargados de los diseños, las necesidades en cuanto a las obras necesarias y recomendaciones generales respecto al diseño geométrico actual, para prevenir futuras afectaciones que generen un riesgo tanto en lo económico como en la misma estructura de la vía. Los sectores críticos identificados corresponden a los siguientes: **Sector K77+700 – K78+660, Sector K79+300 – K79+900, Sector K80+400 – K80+800, Sector K84+980 – K90+400, Sector K91+300 – K93+960, Sector K96+400 – K96+720, Sector K98+035 – K98+300**

De acuerdo con los resultados obtenidos se recomienda desarrollar un levantamiento geológico geotécnico detallado en los sectores de mayor susceptibilidad, que permitan obtener información detallada de

posibles eventos activos que puedan intervenir con el corredor vial, así como contemplar la implementación de obras o modificaciones en el diseño geométrico inicial, que eviten lo mayormente posible estos sectores de susceptibilidad alta, reduciendo en lo máximo posible los riesgos del proyecto de infraestructura vial, lo que es considerado primordial en el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

1. *Servicio Geológico Colombiano*. Documento Metodológico de Zonificación por Susceptibilidad y Amenaza Por Movimientos En Masa. 2013.
2. *Diana De Pietri, Patricia Dietrich, Patricia Mayo y Alejandro Carcagno*. Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina. 2011.
3. *Beatriz Dominique Martinez Pedraza (Universidad de Chile)*. Susceptibilidad de Remoción En Masa En La Quebrada De Macul, Región Metropolitana. 2009.
4. *Scarleth Mujica, Henry Pacheco*. Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. 2013.
5. *Adriana GALVÁN, Armando GARCÍA, Celia LOPÉZ, Victor CARLOS*. Zonificación y susceptibilidad a procesos de remoción en masa, en la delegación Álvaro obregón, ciudad de México. utilizando sistemas de información geográfica (SIG).
6. *IDEAM*. Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. 2012.
7. *Servicio Geológico Colombiano*. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años, escala 1:500.000. 2010.
8. *Servicio Geológico Colombiano*. Atlas de amenaza sísmica de Colombia, mapa de fallas activas de Colombia, plancha 06, escala 1:1'000.000. 1999.
9. *Servicio Geológico Colombiano*. Geología de la plancha 110 Pamplona, escala 1:100.000. 1977.
10. *Servicio Geológico Colombiano*. Cuadrángulo H13 Pamplona – Plancha 110 Pamplona - 121Cerrito, memoria explicativa. 1973.